

Обґрунтування механізму взаємодії вуглеводів жинтьо-пшеничного борошна з наночастинками поліфункціональної харчової добавки «Магнетофуд»

І. В. Цихановська, В. В. Євлаш, О. В. Александров, Т. А. Лазарєва,
Т. О. Євлаш

Вологоутримуюча здатність (ВУЗ) є однією з найважливіших функціонально-технологічних властивостей. Харчова добавка «Магнетофуд» має комплексну дію, в тому числі ВУЗ. Тому важливим є вивчення механізму ВУЗ «Магнетофуд». Встановлено механізм взаємодії наночастинок (НЧ) харчової добавки «Магнетофуд» з функціональними групами біополімерів вуглеводного комплексу житньо-пшеничного борошна. Запропоновано «кластерно-капілярна» модель ВУЗ «Магнетофуд» з вуглеводами тіста. Молекули води спочатку адсорбуються, зокрема, на поверхні зерен крохмалю і в мікрокапілярах. НЧ «Магнетофуд», завдяки нанорозмірів, активної і іонізованої поверхні, біосумісності з полімерними молекулами вуглеводів, легко проникають в пори (мікрокапіляри). НЧ «Магнетофуд» мають високий хімічний потенціал, тому вони активують, наприклад, поверхню крохмальних зерен і внутрішню поверхню капілярів. Наночастинки «Магнетофуд» утворюють комплекси з ОН-групами і ефірними Оксигенами амілози і амілопектину крохмалю за рахунок координаційних зв'язків. Виникають супрамолекулярні ансамблі "«Магнетофуд»-вуглевод" типу «кластерів». НЧ «Магнетофуд» також електростатично взаємодіють з диполями води. Виникають міцні аквакомплекси. Далі молекули H_2O проникають всередину – в найменш організовані ділянки ланцюгів макромолекул полісахаридів. Де утримуються водневими зв'язками з диполями «Магнетофуд» і іонногенними групами вуглеводів: атомами Гідрогену і Оксигену ОН-груп D-глюкопіранозних залишків. Навколо НЧ «Магнетофуд» виникають аквакомплекси, а в «кластерах» – сольватосоціати. Полімерні ланцюги розсуваються і поліпшується проникнення диполів H_2O всередину вуглеводу. Така абсорбція води послаблює міжмакромолекулярні зв'язки в щільних шарах полісахариду і сприяє проникненню в них вологи. Експериментально встановлено, що харчова добавка «Магнетофуд» володіє комплексною дією: сорбційним, комплексоутворюючим, волого- і жирутримуючим. А це призводить до збільшення виходу і поліпшення якості хлібобулочної продукції.

З цієї точки зору результати досліджень становлять інтерес не тільки для України, але і для наукового світу інших країн.

Ключові слова: поліфункціональна харчова добавка, вуглеводний комплекс борошна, механізм взаємодії, «кластерно-капілярна» модель.

1. Вступ

Хліб є незамінним продуктом харчування в щоденному раціоні наших співвітчизників, тому введення в його склад корисних компонентів може істотно вплинути на здоров'я людей. Хліб – на 30 % задовольняє потребу в білку і калоріях, на 50 % – у вітамінах групи В, солях фосфору, заліза, вуглеводах і харчових волокнах [1, 2].

Тісто і готовий хліб – складні гідрофільні колоїдні системи, стан яких залежить від властивостей сировини, що застосовується для приготування, параметрів технологічного процесу, змін, що відбуваються при випічці і зберіганні хліба. Тому стан вологи в тісті і хлібі представляє не тільки теоретичний, а й практичний інтерес [3, 4]. Вологоутримуюча здатність (ВУЗ) – важлива функціонально-технологічна властивість вуглеводовмісної сировини та готової продукції. ВУЗ характеризується ступенем адсорбції води. ВУЗ дорівнює масі води, що утримується 1 г сухої речовини в певних умовах [4].

У вуглеводному комплексі борошна переважають вищі полісахариди – гідроколлоїди (крохмаль, клітковина (целюлоза), геміцелюлоза, пентозани). У невеликій кількості борошно містить сахароподібні полісахариди (ди- і трисахариди) і прості цукри (глюкоза, фруктоза).

При випічці хліба полісахариди частково клейстерізуються і гідролітичним шляхом розщеплюються до декстринів. Також, з плином часу при зберіганні хлібобулочних виробів «погіршується» наноструктура клейстеризованого крохмалю і хліб черствіє. З метою стабілізації наноструктури крохмалю і полісахаридних сольватасоціатів вуглеводного комплексу борошна можна запропонувати наночастинки харчової добавки «Магнетофуд». «Магнетофуд» – поліфункціональна харчова добавка комплексної дії, що є дрібнодисперсним порошком з розміром частинок ~78 нм [5–7].

Структурні елементи з розміром частинок до 100 нм мають якісно новий спектр властивостей: механічних, магнітних, тепло- і електропровідних, оптичних, хімічних і біологічних. Специфічність властивостей наночастинок визначається проявою квантово-механічних ефектів [8, 9].

– зменшенням параметрів кристалічної решітки для феритів типу Fe_3O_4 при зменшенні розміру частинок менше 100 нм. Це супроводжується її переходом з кубічної в октаедричну, а також збільшенням частки поверхнево активних, реакційно здатних атомів [10, 11];

– збільшенням площі поверхні, яка є місцем зосередження кристалічних дефектів, що призводить до зміни хімічного потенціалу та реакційної здатності;

– дуже малим розміром структурних одиниць або високою дисперсністю наночастинок та великої кількістю фазових меж і розвиненої питомої поверхнею. Все це грає визначальну роль у формуванні незвичайних фізико-хімічних властивостей наночастинок: висока реакційна здатність і поверхнева активність, виражена сорбційна активність [12];

– надлишкової вільної енергії наночастинок, яка визначає схильність до нуклеації, сольватації та агрегації з формуванням супрамолекулярних ансамблів, сольватоконплексів, агломератів [13].

Наночастинки харчової добавки «Магнетофуд» мають величезний

потенціал та високу біоспорідненість до біополімерів, зокрема, вуглеводів. Тому несуть в собі безліч важливих фундаментальних відкриттів, нових функціонально-технологічних властивостей і перспективних технологічних застосувань [8, 10]. На поверхні магнітних наночастинок «Магнетофуд» відбувається нековалентна адсорбція полімерних молекул, диполів H_2O . Процес адсорбції полісахаридів та води визначається, в основному, іонними, вандерваальсовими, водневими і гідрофобними видами взаємодій. Ці взаємодії виникають між поверхнею наночастинок і адсорбуючими молекулами і тягнуть за собою зміну вільної енергії Гіббса. Є формування супрамолекулярних ансамблів, які суттєво впливають на функціонально-технологічні властивості сировинних компонентів і напівфабрикатів, а також якість готових продуктів.

Для пояснення механізму ВУЗ наночастинок (НЧ) харчової добавки «Магнетофуд» та механізму взаємодії НЧ «Магнетофуд» з полісахаридами вуглеводного комплексу борошна необхідні певні наукові дії. По-перше, зрозуміти природу і силу взаємодії наночастинок «Магнетофуд» з водою. По-друге зрозуміти природу взаємодії НЧ «Магнетофуд» з відповідними субстратами [14, 15].

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Аналіз літературних джерел [3, 4, 16–40] показує, що для коригування хлібопекарських властивостей, зокрема водопоглинаючої здатності борошна та вологоутримуючої здатності тістових систем, широко використовуються різноманітні сировинні інгредієнти. Однак відсутні дані про моделі взаємодії наночастинок оксидів металів з вуглеводами борошна та інших харчових інгредієнтів.

Основними компонентами, що зв'язують воду в тісті, є білки та *крохмаль*. В наукових роботах показано [3, 4], що 82–85 % всієї введеної в тісто води поглинається крохмалем і білками.

Крохмаль – найважливіший вуглевод борошна, міститься у вигляді зерен розміром від 0,002 до 0,15 мм. Розмір, форма, здатність до набухання і клейстеризації крохмальних зерен різні для борошна різних видів. Крохмаль (рис. 1) є сумішшю 2 гомополісахаридів: лінійного – амілози і розгалуженого – амілопектину, загальна формула яких $(C_6H_{10}O_5)_n$. Співвідношення амілози до амілопектину дорівнює 1:4 [16, 17]. Крохмаль – одночасно і *міцне* і дуже *лабільне* утворення. *Міцність* структури крохмального зерна обумовлюється наявністю в ньому ряду зв'язків («містків»), що скріплюють між собою розташовані одна біля одної макромолекули. Так, велике число ОН-груп, наявних в крохмалі, обумовлює наявність водневого зв'язку. Фосфатна кислота, що міститься в крохмалі, також бере участь в утворенні «містків», даючи ефірні зв'язки між сусідніми ланцюгами макромолекул. Крім того, зміцнення структури крохмалю може статися і за рахунок його низькомолекулярних фракцій. *Лабільність* крохмалю позначається в надзвичайної чутливості його до різних зовнішніх впливів, часом дуже слабким. Крохмаль легко змінює свою структуру. Причому, залежно від характеру і енергії впливу на крохмальне зерно, порушуватимуться одні і залишені незачепленими інші типи зв'язків.

Все це і робить крохмаль надзвичайно рухливим (лабільним) хімічно і колоїдно-хімічним [16–19].

Адсорбція води відбувається в основному на *поверхні зерен крохмалю та в мікрокапілярах*. Волога у мікрокапілярах може бути зв'язана з внутрішньої поверхнею капілярів вуглеводів механічно та фізико-хімічно. Адсорбційна волога найлегше видаляється. Кількість адсорбованої води прямо пропорційна поверхні зерен крохмалю або обернено пропорційно середнього розміру. *Абсорбція води усередині зерен крохмалю* в основному йде на активних центрах, розташованих в аморфних областях. Кількість абсорбованої води обернено пропорційно ступеню кристалічності біополимера і зв'язане з внутрішньою структурою зерен крохмалю [20, 21].

Крохмаль різних рослин неоднаковий по гідрофільності і міцності міцелярної структури. Так, житній крохмаль легше набухає і більшою мірою пептизується (розчиняється), ніж пшеничний [20, 22].

Однією з найбільш важливих властивостей нативного крохмалю є здатність його зерен *набухати* у воді при підвищенні температури, даючи *в'язкий колоїдний розчин (клейстер)*. В процесі *набухання і клейстеризації* частина полісахаридів розчиняється і залишається в порожнині зерна (гранули), а частина макромолекул переходять в розчин. Температура, при якій настає така зміна крохмального зерна, називається *температурою клейстеризації*. Температура клейстеризації пшеничного крохмалю становить 54–62 °С, житнього крохмалю – 50–55 °С. Структуроутворююча фаза в житньо-пшеничному тісті складається з клейковинного «каркаса» і набряклих крохмальних гранул. При випічці хліба полісахариди частково клейстерізуються і гідролітичним шляхом розщеплюються до декстринів. З плином часу при зберіганні хлібобулочних виробів «погіршується» наноструктура клейстеризованного крохмалю і хліб черствіє [20, 23, 24].

Технологічне розщеплення крохмальних гранул здійснюється в умовах підвищеної температури і під дією гідролітичних ферментів (рис. 1) [23]:

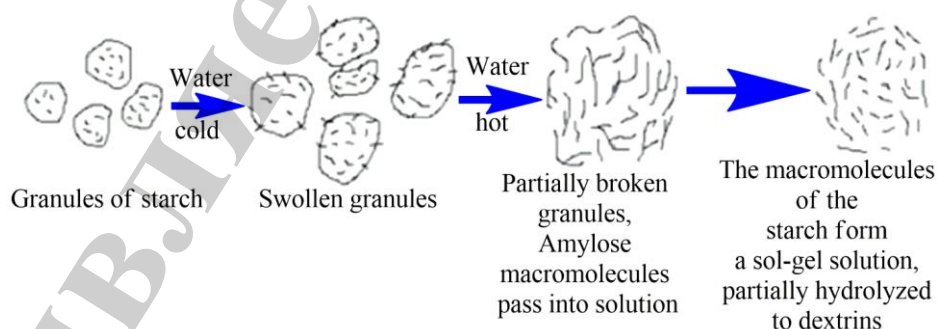


Рис. 1. Схема технологічних змін крохмальних зерен

Порушення агрегативної стійкості дисперсних систем призводить до поділу на макрофази або до виникнення в об'ємі системи просторових фронтальних структур і переходу вільно дисперсної системи (золю) в зв'язано дисперсну гелеву наноструктуру. В результаті гелева система на основі

крохмальних макромолекул набуває комплекс нових структурно-механічних (реологічних) властивостей, до яких відносяться міцність, пружність, еластичність та ін. *Гелеутворення* обумовлено виникненням просторового «каркаса», який блокує плинність [23, 24].

Різноманітні способи технологічної обробки (фізичні, хімічні, біологічні) нативних крохмалів дозволяють істотно змінити будову і властивості, до яких в першу чергу відносяться гідрофільність (зокрема, здатність розчинятися в холодній воді), здатність до клейстеризації і гелеутворенню, стійкість до нагрівання і дії кислот і т. п.

Для стабілізації структури і вологоутримуючої здатності полісахаридів в харчових масах, зокрема у житньо-пшеничному тістовому напівфабрикаті, пропонується поліфункціональна харчова добавка «Магнетофуд». При гідратації вуглеводів в присутності наночастинок (НЧ) харчової добавки «Магнетофуд» *полісахариди* утворюють супрамолекулярні ансамблі з системою водневих, гідрофобних, електростатичних, координаційних зв'язків і переплетенням полімерних молекул.

Для підвищення водопоглинаючої здатності (ВПЗ) борошна та вологоутримуючої здатності (ВУЗ) тістових мас в технологіях хліба використовуються мінеральні сполуки (амонійні солі ортофосфатної кислоти, ортофосфати натрію, калію) [25]. Недоліками цих добавок є недостатня функціональність щодо питомого обсягу, пористості і формостійкості хліба, не розглянуто механізм взаємодії з вуглеводами харчової сировини, борошна та інших інгредієнтів.

Підвищити ВУЗ тіста і фактичний вихід хлібобулочної продукції можна дуже ефективно, застосувавши спеціальні композиції ферментів DSM для некрохмальних полісахаридів борошна [26]. Їх недоліки – вузька спрямованість; відсутність комплексної дії та моделі вологоутримуючої здатності.

Збільшенню вологоутримуючої здатності (ВУЗ) тіста сприяє збагачення біологічно активними речовинами овочевих, фруктових [27] і трав'яних добавок [28]. Недоліками добавок є низька функціональність щодо текстури і фізико-хімічних властивостей хлібобулочних виробів, не обґрунтований механізм взаємодії з вуглеводами порошкоподібної харчової сировини.

Наразі широке поширення отримали різноманітні полісахариди: цитрусові волокна; гідроколоїди рослинного походження, ефіри целюлози. *Гідроколоїди*: бананові і яблучні порошки; обліпиховий шрот; гуарова і ксантанова камеді; полідекстро́за – полісахарид, що складається з полімерів глюкози з низькою молекулярною вагою [29]. *Цитрусові волокна* – джерело корисної для здоров'я клітковини. Зміст харчових волокон в них становить від 88 до 93 %, в тому числі розчинних – близько 20 % [30]. Але вплив на технологічні показники тістових напівфабрикатів і готових виробів не значний. Також відсутня антиоксидантна, бактеріостатична дія, модель вологоутримуючої здатності; висока собівартість.

З метою підвищення водопоглинаючої здатності (ВПЗ) борошна пропонується використовувати натуральні порошкоподібні інгредієнти. Ці

сполуки отримують сушінням молочних [31] і яєчних продуктів [32]: йогурту натурального знежиреного, сиру натурального знежиреного, молока знежиреного, яєчного жовтку і ін.. Їх недоліки – відсутність поліфункціональності і механізму взаємодії з вуглеводами борошна та недостатній вихід готової продукції.

Останнім часом в харчових технологіях для підвищення вологоутримуючої здатності застосовуються різноманітні функціональні інгредієнти, отримані з промислових побічних продуктів: шкіри, копита, пір'я [33]; субпродукти [34]; насіння, висівки [35]; сироватка [36]. Загальним недоліком є вузька спрямованість, недостатня вологоутримуюча здатність і відсутність комплексної дії, не обґрунтований механізм взаємодії з вуглеводами харчової сировини та тістових систем.

В технологіях хліба з метою поліпшення ВУЗ тіста використовуються біодобавки на основі пшениці [37]. Однак вихід і структурно-механічні показники готових виробів не покращуються, відсутня модель вологоутримуючої здатності.

Для підвищення водопоглинаючої здатності борошна та вологоутримуючої здатності тіста у хлібопеченні запропоновані також біодобавки різного хімічного складу: соя, нут [38]; ензими, мікрородорості [39]. Недоліками сої та нуту є недостатня функціональність щодо питомого обсягу, пористості і формостійкості хліба. А для ензимів і мікрородоростей – висока собівартість і недостатній вихід готової продукції. Однак не розглянутий механізм взаємодії з вуглеводами борошна та тістових систем.

В останні роки в хлібопеченні для підвищення ВУЗ борошна та тіста використають фенолопохідні сполуки рослинного походження [40]. Недоліками цих біодобавок є недостатній вихід; час зберігання готової продукції; чи не обґрунтоване модель вологоутримуючої здатності.

Аналіз інформаційних джерел [3, 4, 16–40] показує відсутність даних про використання нанопорошкових добавок-поліпшувачів у технологіях хліба та моделі взаємодії з полімерними матрицями вуглеводного комплексу борошна. Для створення нових функціонально-технологічних властивостей та обґрунтування механізму вологоутримуючої здатності, зокрема у житньо-пшеничній тістовій системі, може бути запропонована поліфункціональна харчова добавка «Магнетофуд». Наночастинки «Магнетофуд» У харчових системах «Магнетофуд» проявляє сорбційні, комплексоутворюючі, емульгуючі, вологоутримуючі, жирутримуючі, вологозв'язуючі властивості, а також сприяє стабілізації показників напівфабрикатів і готових виробів в процесі виробництва і зберігання та отриманню хлібобулочної продукції з високими споживчими характеристиками [5–7, 14, 15].

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є обґрунтування механізму взаємодії вуглеводів житньо-пшеничного борошна з наночастинками (НЧ) харчової добавки «Магнетофуд» для підвищення вологоутримуючої здатності тіста.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- обґрунтувати механізм взаємодії наночастинок (НЧ) харчової добавки «Магнетофуд» з функціональними групами біополімерів вуглеводного комплексу житньо-пшеничного борошна;
- встановити механізм впливу НЧ харчової добавки «Магнетофуд» на зв'язок вологи біополімерами вуглеводного комплексу житньо-пшеничного тіста;
- обґрунтувати механізм взаємодії наночастинок харчової добавки «Магнетофуд» з біополімерами вуглеводного комплексу житньо-пшеничного тіста та пояснити його вологоутримуючу здатність.

4. Матеріали та методи дослідження харчової добавки «Магнетофуд»

4.1. Досліджувані матеріали та обладнання, що використовували в експерименті

Досліджували вплив НЧ поліфункціональної харчової добавки «Магнетофуд» на технологічні властивості, зокрема вологоутримуючу здатність, житньо-пшеничного тіста.

Об'єкт дослідження: технологія житньо-пшеничного хліба.

Предмети досліджень:

- зразок 1 контрольний – сухий житньо-пшеничний крохмаль, представляючий собою суміш житнього крохмалю першого гатунку [ТУ 10.62.11-668-37676459-2017. Крахмал фасований. Научно-производственный центр «Агропищепром»] та пшеничного крохмалю вищого гатунку [РСТ УССР 1490-90 Крохмаль пшеничний. Технічні умови]. Співвідношення крохмалю житнього і пшеничного дорівнює 60:40;
- зразок 2 – сухий житньо-пшеничний крохмаль з поліфункціональною харчовою добавкою «Магнетофуд» у кількості 0,10 % до маси крохмалю у вигляді порошку [6];
- зразок 3 сухий житньо-пшеничний крохмаль з поліфункціональною харчовою добавкою «Магнетофуд» у кількості 0,15 % до маси крохмалю у вигляді порошку [6];
- зразок 4 – сухий житньо-пшеничний крохмаль з поліфункціональною харчовою добавкою «Магнетофуд» у кількості 0,20 % до маси крохмалю у вигляді порошку [6];
- зразок 5 контрольний – житньо-пшеничне борошно згідно з ДСТУ-П 4583:2006. Співвідношення борошна житнього обдирного і пшеничного першого гатунку дорівнює 60:40 згідно з базовою рецептурою житньо-пшеничного хліба «Дарницький» [42];
- зразок 6 – житньо-пшеничне борошно з поліфункціональною харчовою добавкою «Магнетофуд» у кількості 0,10 % до маси борошна у вигляді порошку [6];
- зразок 7 – житньо-пшеничне борошно з поліфункціональною харчовою добавкою «Магнетофуд» у кількості 0,15 % до маси борошна у вигляді порошку [6];
- зразок 8 – житньо-пшеничне борошно з поліфункціональною харчовою

добавкою «Магнетофуд» у кількості 0,20 % до маси борошна у вигляді порошку [6].

Більш детально досліджувані матеріали, обладнання та методики, що використовували в експерименті, описано в роботі [41].

5. Результати досліджень механізму взаємодії харчової добавки «Магнетофуд» із вуглеводами житньо-пшеничного борошна

Дослідження впливу поліфункціональної харчової добавки «Магнетофуд» на набухаємість, в'язкість суспензій з водою, вологоутримуючу здатність проводили на модельних системах. Поліфункціональну харчову добавку «Магнетофуд» вводили в сухому вигляді при приготуванні дослідних зразків крохмалю та житньо-пшеничного борошна у кількості 0,10–0,20 % до маси крохмалю або борошна у вигляді порошку [6].

Властивості крохмалю, борошна та тіста і виготовленого з нього хліба залежать від стану води, що міститься в них, співвідношення вологи, що знаходиться у вільному і зв'язаному стані. Для з'ясування механізму впливу харчової добавки «Магнетофуд» на інгредієнтні вуглеводного комплексу житньо-пшеничного тіста, в роботі досліджувалася кількість зв'язаної і вільної вологи у дослідних зразках житньо-пшеничного крохмалю.

У попередніх дослідженнях [14, 15] детально розглядалися процеси адсорбції води на поверхні НЧ харчової добавки «Магнетофуд». Також механізми взаємодій, які виникають між НЧ «Магнетофуд» та іоногенними групами вуглеводів.

Для пояснення збільшення вологоутримуючої здатності (ВУЗ) тіста з житньо-пшеничного борошна з НЧ «Магнетофуд» можна запропонувати «кластерно-капілярну» модель, яка пояснює утворення зв'язків між харчовою добавкою «Магнетофуд», вологою та вуглеводами тіста.

За даними Бушука, із загальної кількості води, що поглинається борошняним напівфабрикатом, 31,1 % сорбується білком; 45,5 % – крохмалем і 23,4 % – пентозанами [3].

Крохмаль дуже лабільний та чутливий до хімічних реагентів, зокрема металовмісних. Особливо сильно на крохмаль впливають електроліти, зокрема на процеси набухання та клейстеризації крохмалю.

Наночастинки (НЧ) «Магнетофуд» модифікують крохмаль, змінюють його будову, сприяючи посиленню розчинності і набухання навіть в холодній воді. В основному НЧ харчової добавки «Магнетофуд» взаємодіють з полісахаридами за рахунок нековалентної координації.

На рис. 2 проілюстровано внутрішньо-молекулярний комплекс НЧ «Магнетофуд» з головним ланцюгом амілози (або амілопектину) крохмалю.

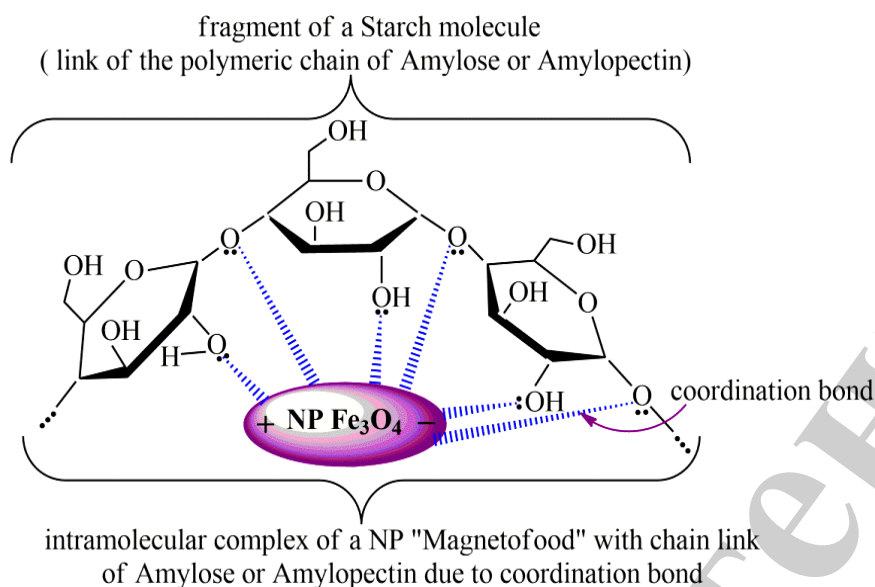


Рис. 2. Внутрішньо-молекулярний комплекс, утворений НЧ харчової добавки «Магнетофуд» і ланкою головного ланцюга амілози (або амілопектину)

Поляризовані наночастинки (НЧ) харчової добавки «Магнетофуд», проникаючи в мікрокапіляри і взаємодіючи з іонногенними групами біополімерів, активують крохмаль, сприяючи його набухання. На рис. 3 наведено результати взаємодії НЧ харчової добавки «Магнетофуд» з водою та фрагментом головного ланцюга амілози (або амілопектину).

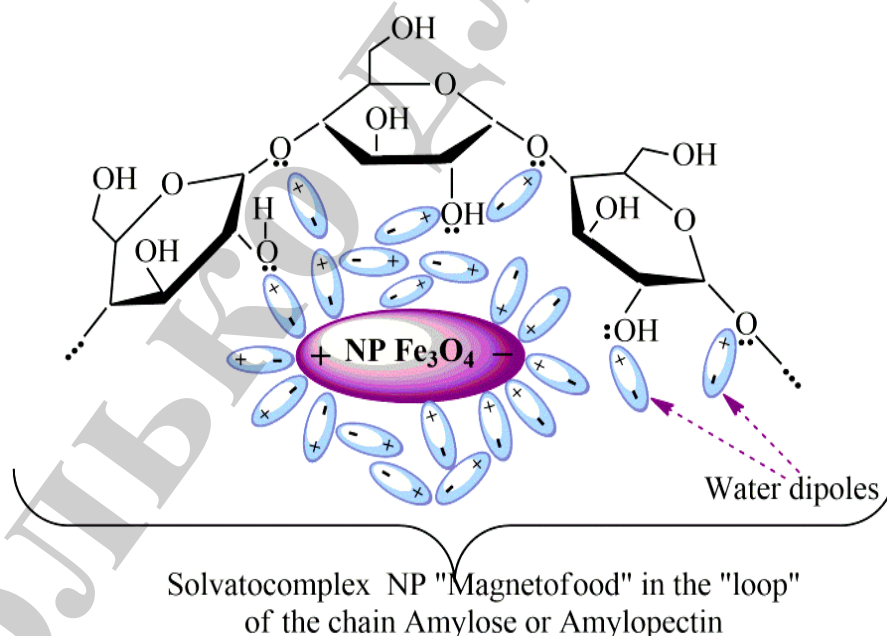


Рис. 3. Сольватокмплеск всередині мікрокапіляра, внутрішні стінки якого створені ланками головного ланцюга амілози (або амілопектину)

На рис. 4, 5 проілюстровано внутрішньо- та міжмолекулярні комплекси НЧ «Магнетофуд» з ланкою ланцюга амілопектину (рис. 4) та ланками двох

ГОЛОВНИХ ЛАНЦЮГІВ АМІЛОПЕКТИНУ (або амілози) (рис. 5).

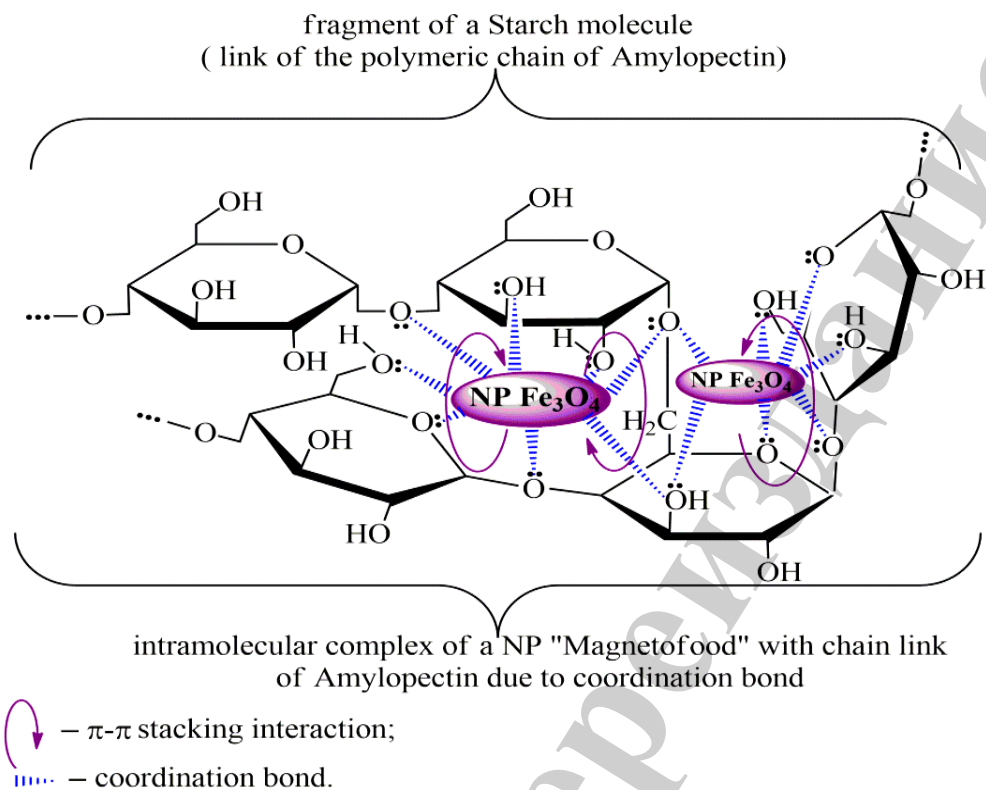


Рис. 4. Внутрішньо-молекулярний комплекс, утворений НЧ харчової добавки «Магнетофуд» і ланкою ланцюга амілопектину

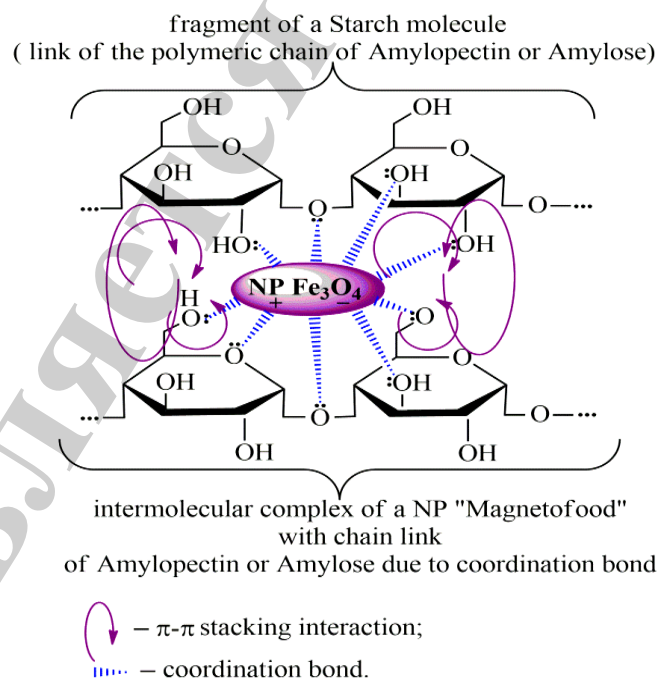


Рис. 5. Міжмолекулярний комплекс, утворений НЧ харчової добавки «Магнетофуд» і ланками двох головних ланцюгів амілопектину (або амілози)

З даних рис. 4, 5 слід, що між наночастинками добавки «Магнетофуд» і Оксигенами (ефірними, піранозними, і гідроксильними) залишків D-глюкопіранози виникають координаційні взаємодії.

На рис.6 та рис. 7 наведено розподіл диполів води в «кластерах» ланок сольватованих полімерних ланцюгів амілопектину та амілози.

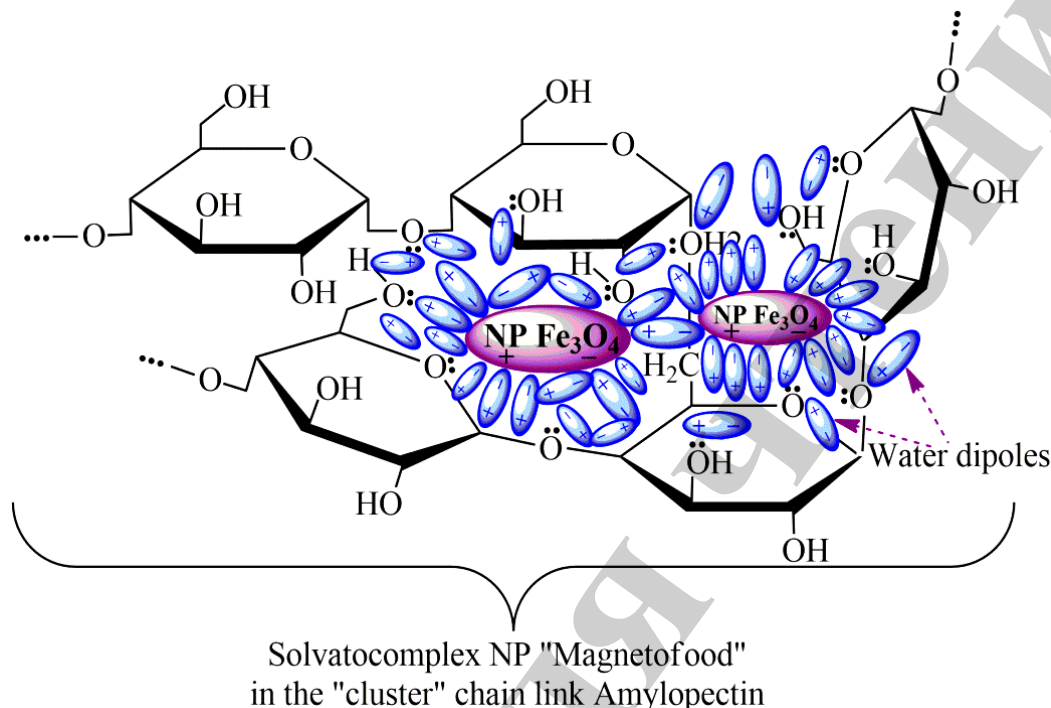


Рис. 6. Розподіл диполів води в «кластерах» ланки сольватованого полімерного ланцюга амілопектину

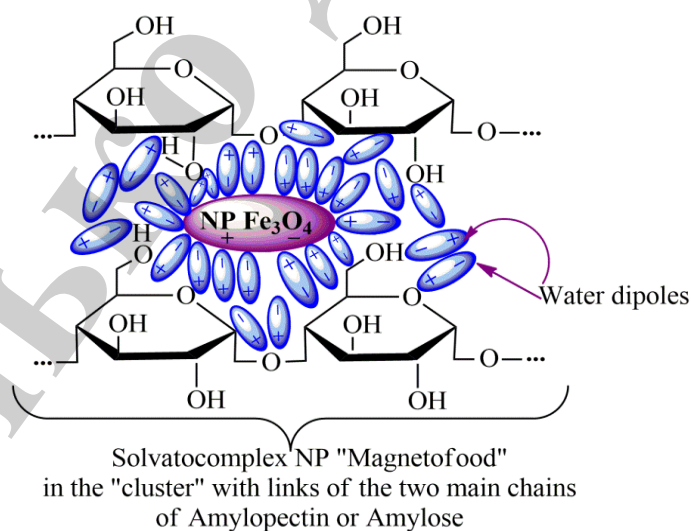


Рис. 7. Розподіл диполів води в «кластерах» ланок двох сольватованих полімерних ланцюгів амілопектину та амілози

З рис. 6 та рис. 7 видно, що зростання ступеня розгалуження полімерних ланцюгів амілопектину та амілози покращує проникнення H_2O всередину

крохмалю.

Така абсорбція H_2O послаблює міжмакромолекулярні зв'язки в щільних шарах і сприяє проникненню вологи в найбільш кристалічні шари. В результаті поліпшується набухання, водопоглинаюча та вологоутримуюча здатність крохмалю.

Велику роль у формуванні функціонально-технологічних властивостей житньо-пшеничного борошна відіграють структурні полісахариди, такі як *целюлоза* та *геміцелюлози*.

При введенні харчової добавки «Магнетофуд» в рецептуру житньо-пшеничного тіста, структурні вуглеводи також піддаються її дії. Тому далі розглянемо механізми взаємодії НЧ «Магнетофуд» з целюлозою, геміцелюлозами. Розглянемо вплив добавки «Магнетофуд» на їх водопоглинаючу та вологоутримуючу здатність.

На рис. 8 наведено механізм взаємодії НЧ харчової добавки «Магнетофуд» з ланкою ланцюга целюлози.

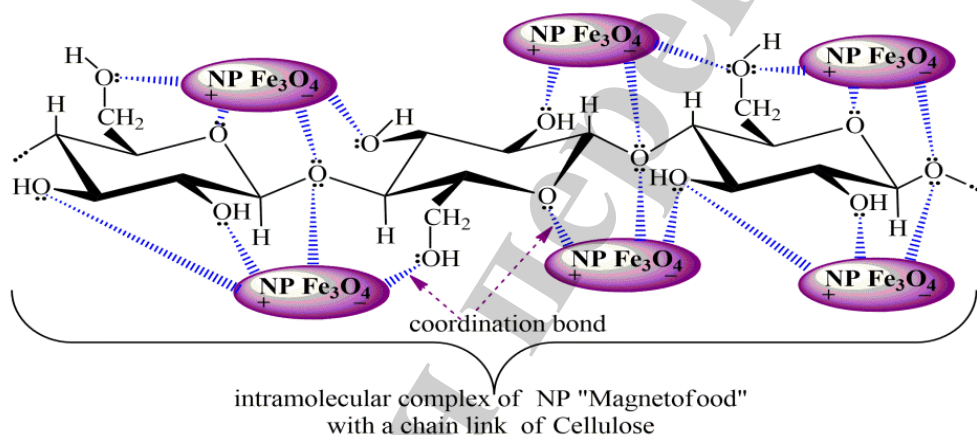


Рис. 8. Внутрішньо-молекулярний комплекс, утворений НЧ харчової добавки «Магнетофуд» і ланкою ланцюга целюлози

На рис. 9 наведено розподіл диполів H_2O в ланці ланцюга целюлози.

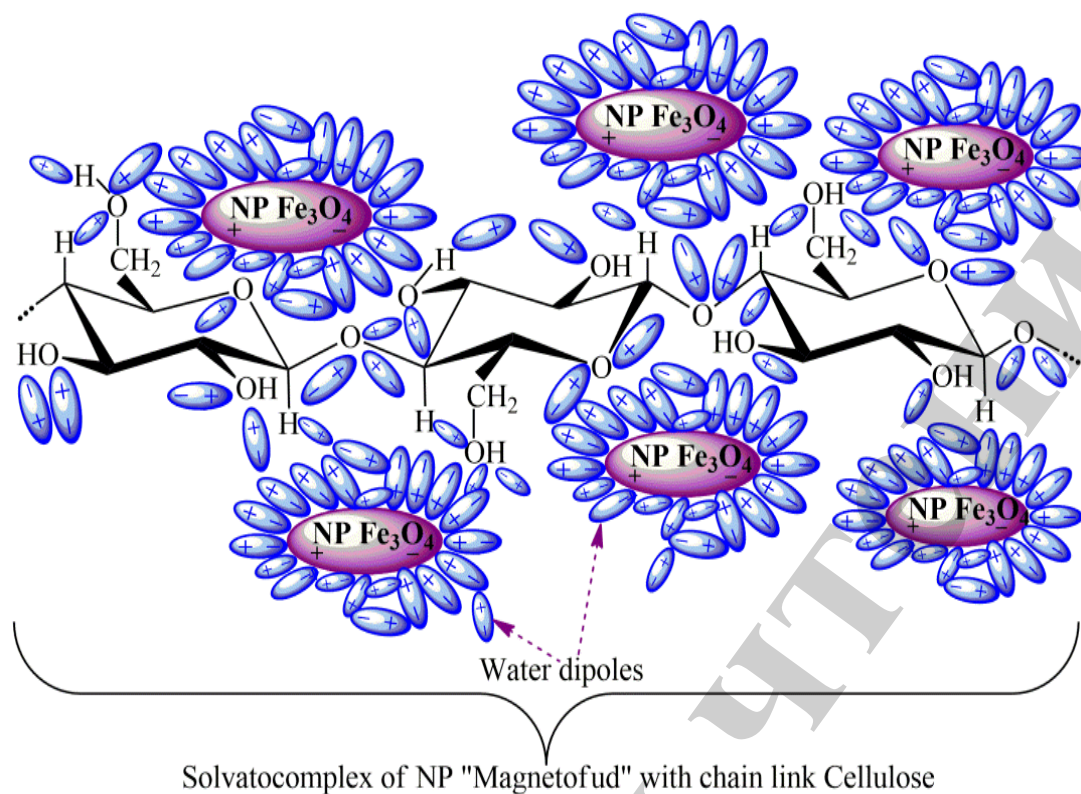


Рис. 9. Розподіл диполів води в ланці ланцюга целюлози

З даних рис. 8 та рис. 9 випливає, що завдяки відкритій (лінійній нерозгалуженій) будові целюлози і доступності центрів гідрофільності (НЧ «Магнетофуд», ОН-груп та ін.) утворюються сольовоасоціати.

У підсумку поліпшується абсорбція вологи на гідрофільних центрах за рахунок водневих зв'язків. А це, поряд з дрібно подрібненою текстурою, сприяє кращому набухання целюлози борошна (рис. 10).

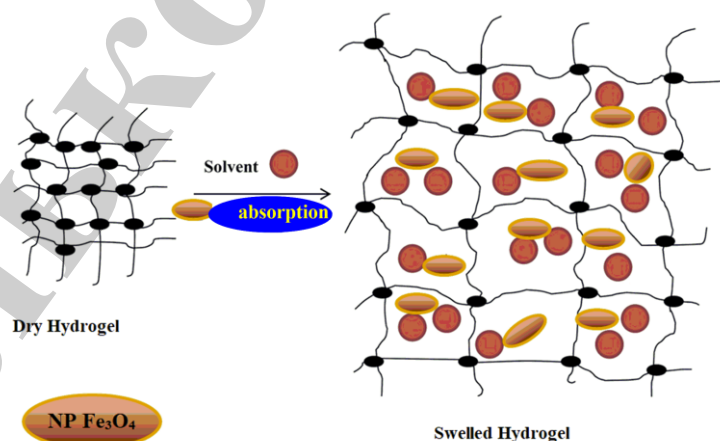


Рис. 10. Процес набухання гідроколоїда

Більшість *геміцелюлоз* мають нерегулярну будову, містять розгалужені ділянки. Геміцелюлози як і целюлоза відносяться до категорії гідрофільних

колоїдів, гідратація яких обумовлена електростатичними силами. Тому для геміцеллюлоз можна також застосувати «кластерно-капілярну» модель гідратації під впливом харчової добавки «Магнетофуд».

Розглянемо вплив НЧ харчової добавки «Магнетофуд» на будову макромолекул геміцеллюлоз і механізми взаємодії добавки «Магнетофуд» з іонногенними групами макромолекул полімера і з поляризованими молекулами води. Ці механізми для глюкоманану аналогічні целюлозі (рис. 8, 9). На рис. 11 наведено самоорганізація у електростатичний комплекс НЧ харчової добавки «Магнетофуд» з ланкою ланцюга ксилану.

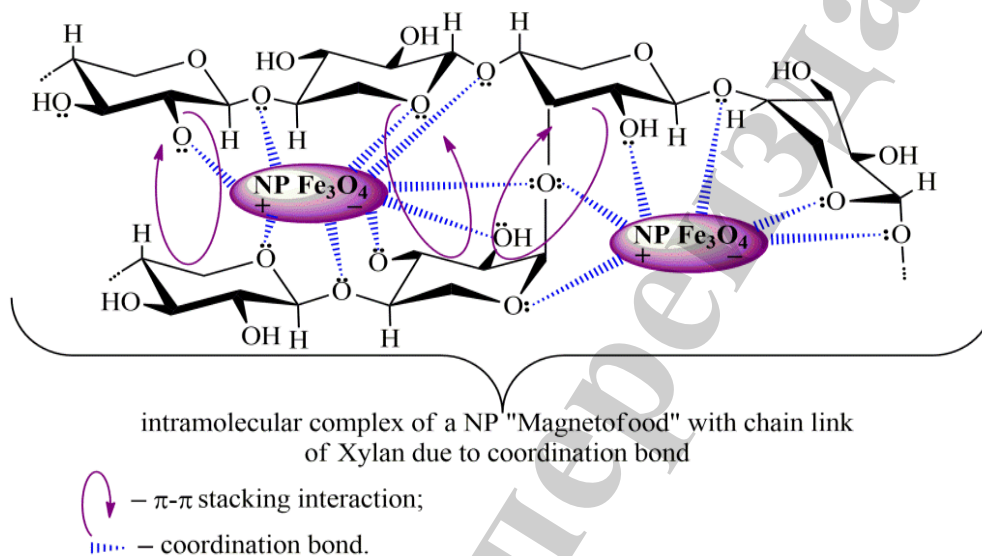


Рис. 11. Самоорганізація у електростатичний комплекс НЧ харчової добавки «Магнетофуд» з ланкою ланцюга ксилану

Дані рис. 11 показують, що утворюються електростатичні комплекси НЧ «Магнетофуд» з ксиланом.

На рис. 12 наведено розподіл диполів води в ланці ланцюга ксилану.

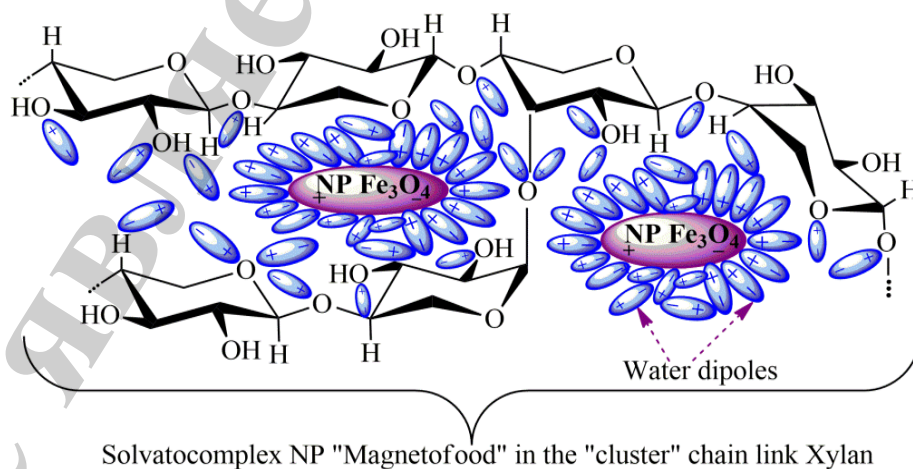


Рис. 12. Сольватоконплеси в «кластерах» ланка ланцюга ксилану

З рис. 11, 12 слід, що під впливом НЧ «Магнетофуд» збільшується ступінь розгалуження макромолекул і зростає кількість доступних гідрофільних центрів; виникають «кластери», в яких утримується і вільна і зв'язана волога у вигляді молекул води та сольватоккомплексів.

6. Обговорення результатів дослідження впливу харчової добавки «Магнетофуд» на вологоутримуючу здатність житньо-пшеничного тіста

Аналіз експериментальних даних (рис. 2) показує, що між НЧ «Магнетофуд» та головним ланцюгом амілози (або амілопектину) виникає електростатичний комплекс. Цей агрегат утворюється за рахунок шести внутрішньо-молекулярних координаційних зв'язків між НЧ «Магнетофуд» і атомами Оксигену піранозних циклів глюкози.

Аналіз даних рис. 3 показує, що в порах (мікрокапілярах) крохмалю НЧ «Магнетофуд» є центрами гідрофільності. НЧ харчової добавки «Магнетофуд» вступають в диполь-дипольні і іонно-дипольні взаємодії з поляризованими молекулами води. Утворюються сольватоккомплекси.

Таким чином, при контакті крохмалю з водою її молекули спочатку *адсорбуються на поверхні зерен крохмалю та в мікрокапілярах*. Далі молекули води проникають у крохмаль з утворенням водневих зв'язків в найменш організовані ділянки ланцюга макромолекул. Виникають утворення: *«Магнетофуд»-вуглевод* типу *«кластерів»*.

З даних рис. 4 та рис. 5 видно, що координаційні зв'язки підсилюють π - π стекінг взаємодію піранозних циклів по типу «площина-до-площини». У молекулі амілопектину (або амілози) π - π стекінг взаємодія обумовлена електростатичними силами: гідрофобними і дисперсійними лондоновськими між залишками глюкопіраноз. Все це сприяє: по-перше, збільшенню ступеня розгалуження головного ланцюга амілопектину (або амілози), по-друге, виникнення утворень типу «кластерів».

Тобто під впливом НЧ харчової добавки «Магнетофуд» у крохмалі формуються внутрішньо- та міжмолекулярні асоціати. Їх результатом є виникнення утворень типу «кластерів»; переплетення високо гіллястих молекул амілопектину та спіральних ланцюгів амілози в складну мережу (сітчасту або ґратчасту) зв'язаних між собою полімерних молекул. Самі НЧ «Магнетофуд» є центрами гідрофільності, а «кластери» – утвореннями, які зв'язують і добре утримують вологу.

Більш розгалужена будова полегшує взаємодію крохмалю з водою. Наночастинки харчової добавки «Магнетофуд» впливають на ланцюгову структуру крохмалю, збільшуючи ступінь її розгалуження (рис. 6 та рис. 7) та покращуючи проникнення H_2O всередину крохмалю. Водневі зв'язки утворюється між диполями води і диполями НЧ «Магнетофуд», а також атомами Гідрогену і Оксигену ОН-груп D-глюкопіранозних залишків крохмалю. Навколо НЧ «Магнетофуд» утворюються аквакомплекси, а в «кластерах» виникають сольватосоціати. Це розсуває полімерні ланцюги та покращує проникнення води всередину крохмалю.

Така абсорбція H_2O послаблює міжмакромолекулярні зв'язки в щільних шарах і сприяє проникненню вологи в найбільш кристалічні шари. В результаті поліпшується набухання, водопоглинаюча та вологоутримуюча здатність крохмалю.

Таким чином, мікропориста будова крохмальних зерен та поляризовані наночастинки «Магнетофуд» з великою питомою поверхнею обумовлюють високу сорбційну здатність крохмально-магнетофудової суміші. Завдяки гідрофільним властивостям НЧ харчової добавки «Магнетофуд» та макромолекул амілози і амілопектину крохмальні гранули, що збагачені добавкою «Магнетофуд», дуже гігроскопічні.

Нами запропоновано «кластерно-капілярна» модель вологоутримуючої здатності харчової добавки «Магнетофуд» з вуглеводами житньо-пшеничного тіста. Суть якої полягає в наступному (розглянемо на прикладі крохмалю). При контакті вуглеводо-магнетофудової суміші з водою її молекули спочатку *адсорбуються на поверхні зерен крохмалю та в мікрокапілярах*. У відсутності НЧ «Магнетофуд» волога зв'язується з поверхнею зерен та внутрішньою поверхнею капілярів механічно та фізико-хімічно. При збагаченні крохмалю харчовою добавкою «Магнетофуд» зростає водопоглинаюча та вологоутримуюча здатність крохмалю. НЧ «Магнетофуд», завдяки нанорозмірам (78 нм), активної й іонізованої поверхні, біоспорідненості з вуглеводами, легко проникають в пори (мікрокапіляри) крохмалю. НЧ «Магнетофуд» мають високий хімічний потенціал, тому активують поверхню крохмальних зерен та внутрішню поверхню капілярів. Наночастинки добавки «Магнетофуд» утворюють комплекси з ОН-групами та ефірними Оксигенами амілози і амілопектину за рахунок координаційних зв'язків. При цьому НЧ «Магнетофуд» також вступають в електростатичні взаємодії з диполями води. Утворюються сольваток комплекси. Сольваток комплексами вода міцніше утримується порівняно з механічно і фізико-хімічно зв'язаною вологою.

Далі молекули води проникають у крохмаль з утворенням водневих зв'язків в найменш організовані ділянки ланцюга макромолекул та утворення «Магнетофуд»-вуглевод типу «кластерів». Водневі зв'язки утворюються між диполями води і диполями НЧ «Магнетофуд», а також атомами гідрогену і оксигену ОН-груп D-глюкопіранозних залишків крохмалю. Навколо НЧ «Магнетофуд» утворюються аквакомплекси, а в «кластерах» виникають сольватоасоціати. Це розсуває полімерні ланцюги та покращує проникнення води всередину крохмалю. Така абсорбція води послаблює міжмакромолекулярні зв'язки в щільних шарах і сприяє проникненню вологи в найбільш кристалічні шари. Молекули води, що сорбовані в об'ємі зерен крохмалю, знаходяться в трьох станах у вигляді:

- 1) розчинених (вільних) в матриці молекул;
- 2) первинно сорбованих (сильно зв'язаних) на активних центрах НЧ «Магнетофуд» та молекул даного полісахариду;
- 3) вдруге сорбованих на активних центрах (кластерних) молекул.

Цей процес проходить через етап гелеутворення, коли крохмальні зерна набухають і збільшуються в об'ємі завдяки силам когезії між макромолекулами.

З даних рис. 8 випливає, що внутрішньо молекулярний комплекс у молекулі целюлози утворюється за рахунок координаційних взаємодій наночастинок «Магнетофуд» з атомами Оксигену (гідроксильні, ефірні і піранозні). Кожна наночастинка «Магнетофуд» координує навколо себе не менше 3–4 атомів Оксигену.

НЧ «Магнетофуд» та гідрофільні складові целюлози (ОН – групи, атоми Оксигену – ефірні і піранозні) здатні вступати в електростатичні взаємодії та утворювати водневі зв'язки з поляризованими молекулами H_2O .

Аналіз рис. 8, 9 показує, що висока реакційна та комплексоутворююча здатність НЧ харчової добавки «Магнетофуд» спричиняє зростання енергетичного потенціалу гідрофільних складових целюлози та покращенню:

1) адсорбції диполів H_2O у мікрокапілярах, які побудовані в тривимірну сітчасту структуру;

2) проникненню поляризованих молекул H_2O всередину целюлози за рахунок розсування полімерних ланцюгів та послаблення міжмакромолекулярних зв'язків в щільних шарах.

У підсумку поліпшується абсорбція вологи на гідрофільних центрах за рахунок водневих зв'язків. А це, поряд з дрібно подрібненою текстурою, сприяє кращому набухання целюлози борошна (рис. 10).

Дані рис. 11 показують, що кожна НЧ «Магнетофуд» вступає в 6 і більше координаційних взаємодій з атомами Оксигену (гідроксильні, ефірні, піранозні) ксилану. Утворюються електростатичні комплекси. Які поряд з гідрофобними взаємодіями «площина-до-площині» піранозних циклів підсилюють ступінь розгалуження ланцюгів полімеру та спричиняють виникненню утворень типу «кластерів».

З рис. 11, 12 випливає, що під впливом НЧ «Магнетофуд» збільшується ступінь розгалуження макромолекул ксилану, а саме з'являються бічні ланцюги, котрі розсовують головні ланцюги. В результаті зростає кількість доступних гідрофільних центрів. Також виникають «кластери», в яких утримується і вільна і зв'язана волога у вигляді молекул води та сольватокмплексів.

При утворенні сольватокмплексів на поверхні колоїдних частинок полісахаридів, зокрема ксилану, за рахунок електричних зарядів, що виникають внаслідок іонізації, утворюються оболонки, що складаються з диполів води, орієнтованих в залежності від знака заряду високомолекулярних сполук своїм позитивним або негативним кінцем. Аналогічно формується сольватокмплес на іонізованих НЧ «Магнетофуд». В результаті поліпшується гідратація і набухання. Цим пояснюється краща гігроскопічність, водопоглинаюча та вологоутримуюча здатність геміцелюлоз в порівнянні з целюлозою.

Недоліком даного дослідження є те, що запропонована «кластерно-капілярна» модель взаємодії харчової добавки «Магнетофуд» з полісахаридами житньо-пшеничного борошна розглянуто лише на одному виді тістової системи – житньо-пшеничній. Також невідомо, як ця добавка буде впливати на технологічні показники тістових напівфабрикатів іншого рецептурного складу (з інших видів і сортів борошна).

Позитивною стороною є те, що у роботі запропонована модель взаємодії НЧ харчової добавки «Магнетофуд» з полісахаридами. Ця модель може бути використана для вивчення функціонально-технологічних показників, зокрема ВУЗ, вуглеводних комплексів інших харчових систем (м'ясних, молочних та ін.).

7. Висновки

1. Встановлено механізм взаємодії наночастинок (НЧ) харчової добавки «Магнетофуд» з функціональними групами біополімерів вуглеводного комплексу житньо-пшеничного борошна: крохмалю (амілопектину та амілози), целюлози, геміцелюлоз, зокрема ксилану. Зі наночастинками (НЧ) харчової добавки «Магнетофуд» полісахариди утворюють супрамолекулярні ансамблі з системою хімічних зв'язків та електростатичних взаємодій.

2. Встановлено механізм впливу НЧ харчової добавки «Магнетофуд» на зв'язок води біополімерами вуглеводного комплексу житньо-пшеничного тіста. При гідратації вуглеводів НЧ «Магнетофуд» взаємодіють з біополімерами вуглеводного комплексу. При цьому виникає система водневих, гідрофобних, електростатичних, координаційних зв'язків; переплетення полімерних молекул. В результаті утворюються клатрати, кавітати, кластери, аквакомплекси та сольватасоціації.

3. Запропонована «кластерно-капілярна» модель вологоутримуючої здатності харчової добавки «Магнетофуд» з вуглеводами житньо-пшеничного тіста. При контакті вуглеводо-магнетофудової суміші з водою її молекули спочатку *адсорбуються на поверхні зерен крохмалю та в мікрокапілярах*. У відсутності НЧ «Магнетофуд» вода зв'язується з поверхнею зерен та внутрішньою поверхнею капілярів механічно та фізико-хімічно. НЧ харчової добавки «Магнетофуд» утворюють комплекси з ОН-групами та ефірними Оксигенами вуглеводу. Також вступають в електростатичні взаємодії з диполями води. Утворюються сольваток комплекси. Сольваток комплексами вода міцніше утримується в порівнянні з механічно і фізико-хімічно зв'язаною водою.

Далі молекули H_2O проникають в найменш організовані ділянки ланцюга макромолекул, зокрема крохмалю. Виникають водневі зв'язки та утворення «Магнетофуд»-вуглевод типу «кластерів». Водневі зв'язки виникають між диполями води і диполями НЧ «Магнетофуд». Також між атомами Гідрогену і Оксигену ОН-груп D-глюкопіранозних залишків крохмалю. Навколо НЧ «Магнетофуд» утворюються аквакомплекси, а в «кластерах» виникають сольватасоціації. Це покращує проникнення води всередину біополімерної матриці. Зростає гідратація та водоутримуюча здатність вуглеводу.

Література

1. Обзор рынка хлебобулочных и кондитерских изделий Украины // Хлебопекарское и кондитерское Дело. 2012. № 3, 6.
2. Волкова С. Ф., Золотухина А. О. Состояние и перспективы развития хлебопекарной промышленности Украины // Економіка харчової промисловості. 2012. № 3 (15). С. 51–55.

3. Определение связанной воды индикаторным методом в хлебопекарном производстве / Юрчак В. Г., Берзина Н. И., Шмаровоз В. М., Прищепа М. П. // Известия Вузов. Пищевая технология. 1989. № 4. С. 78–80.
4. Ауэрман Л. Я. Технология хлебопекарного производства: учеб. / под ред. Л. И. Пучковой. СПб.: Профессия, 2003. 253 с.
5. The study of nanoparticles of magnetite of the lipid-magnetite suspensions by methods of photometry and electronic microscopy / Alexandrov A., Tsykhanovska I., Gontar T., Kokodiy N., Dotsenko N. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 4, Issue 11 (82). P. 51–61. doi: 10.15587/1729-4061.2016.76105
6. Design of technology for the rye-wheat bread “Kharkivski rodnichok” with the addition of polyfunctional food additive “Magnetofood” / Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazarieva T., Svidlo K., Gontar T. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 6, Issue 11 (90). P. 48–58. doi: 10.15587/1729-4061.2017.117279
7. Технология производства и показатели качества пищевой добавки на основе магнетита / Илюха Н. Г., Барсова З. В., Цихановская И. В., Коваленко В. А. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. Т. 6, № 10 (48). С. 32–35. URL: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/5847/5271>
8. Chaudhry O., Castle P., Watkins R. Nanotechnology in food. RSC Publishing, 2010. 300 p.
9. Полумбрик М. О. Нанотехнології в харчових продуктах // Харчова промисловість. 2011. № 10. С. 319–322.
10. Sozer N., Kokini J. L. Nanotechnology and its applications in the food sector // Trends in Biotechnology. 2009. Vol. 27, Issue 2. P. 82–89. doi: 10.1016/j.tibtech.2008.10.010
11. Полумбрик М. О. Вуглеводи в харчових продуктах і здоров'я людини. К.: Академперіодика, 2011. 487 с.
12. Баранов Д. А., Губин С. П. Магнитные наночастицы: достижения и проблемы химического синтеза // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2009. Т. 1, № 1-2. С. 129–145.
13. Magnetic nanoparticles: preparation, structure and properties / Gubin S. P., Koksharov Y. A., Khomutov G. B., Yurkov G. Y. // Russian Chemical Reviews. 2005. Vol. 74, Issue 6. P. 489–520. doi: 10.1070/rc2005v074n06abeh000897
14. Substantiation of the mechanism of interaction between biopolymers of rye-and-wheat flour and the nanoparticles of the magnetofood food additive in order to improve moisture-retaining capacity of dough / Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazarieva T., Svidlo K., Gontar T. et. al. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 2, Issue 11 (92). P. 70–80. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126358
15. Investigation of the moisture-retaining power of rye-wheat gluten and flour with polyfunctional food supplement “Magnetofood” / Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazareva T., Svidlo K., Gontar T. et. al. // EUREKA: Life Sciences. 2018. Issue 2. P. 67–76. doi: 10.21303/2504-5695.2018.00611

16. Фізична та колоїдна хімія: підр. / Кабачний В. І., Грицан Л. Д., Томаровська Т. О. та ін.; за ред. В. І. Кабачного. 2-ге вид., перероб. та доп. Харків: НФаУ: Золоті сторінки, 2015. 432 с.
17. Ершов Д. А. Коллоидная химия. Физическая химия дисперсных систем: учеб. М.: Изд. группа «ГЭОТАР-Медиа», 2014. 352 с.
18. Крахмал и крахмалопродукты: монография / Литвяк В. В., Росляков Ю. Ф., Бутрим С. М., Козлова Л. Н.; под ред. Ю. Ф. Рослякова. Краснодар: Изд. ФГБОУВПО «КубГТУ», 2013. 204 с.
19. Ловкис З. В., Литвяк В. В., Петюшев Н. Н. Технология крахмала и крахмалопродуктов: учеб. пос. Минск: Асобный, 2007. 178 с.
20. Рихтер М., Аугустат З., Ширбаум Ф. Избранные методы исследования крахмала. М.: Пищевая промышленность, 1975. 252 с.
21. Технология крахмала и крахмалопродуктов / Трегубов Н. Н., Жарова Е. Я., Жушман А. И., Сидорова Е. К.; под ред. Н. Н. Трегубова. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1981. 472 с.
22. Sorption and desorption of water vapor by grains of native starch of some crops / Ugrozov V. V., Shebershneva N. N., Filippov A. N., Sidorenko Y. I. // Colloid Journal. 2008. Vol. 70, Issue 3. P. 366–371. doi: 10.1134/s1061933x08030150
23. Климовский Д. Н., Стабников В. Н. Технология спирта: учеб. / под ред. А. Л. Малченко. 3-е изд., доп. и перераб. М.: Пищепромиздат, 1980. 356 с.
24. Кульман А. Г. Физическая и коллоидная химия: учеб. / под ред. П. А. Ребиндера. изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Пищепромиздат, 1983. 586 с.
25. Матвеева И. В., Велицкая И. Г. Пищевые добавки и хлебопекарные улучшители в производстве хлеба: учеб. Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 1998. 328 с.
26. Maforimbo E., Skurray G. R., Nguyen M. Evaluation of l-ascorbic acid oxidation on SH concentration in soy-wheat composite dough during resting period // LWT – Food Science and Technology. 2007. Vol. 40, Issue 2. P. 338–343. doi: 10.1016/j.lwt.2005.09.008
27. Wheat Flour Proteins as Affected by Transglutaminase and Glucose Oxidase / Rosell C. M., Wang J., Aja S., Bean S., Lookhart G. // Cereal Chemistry Journal. 2003. Vol. 80, Issue 1. P. 52–55. doi: 10.1094/cchem.2003.80.1.52
28. Пищевые добавки на основе растительного сырья, применяемые в производстве хлебобулочных и мучных кондитерских изделий / Тамазова С. Ю., Лисовой В. В., Першакова Т. В., Казимирова М. А. // Политематический сетевой электронный научный журнал КубГАУ. 2016. № 122 (08). С. 1–8. doi: 10.21515/1990-4665-122-076
29. Спецификации для пищевых добавок и рецептуры. Цитрусовые волокна Herbacel AQ Plus – тип N. URL: <http://specin.ru/kletchatka/109.htm>
30. Горшунова К. Д., Семенова П. А., Бессонов В. В. Взаимодействие гидроколлоидов и водорастворимых витаминов при конструировании обогащенных пищевых продуктов // Пищевая промышленность. 2012. № 11. С. 46–49.

31. Функционально-технологические свойства порошкообразного сырья и пищевых добавок в производстве кондитерских изделий / Рензьева Т. В., Тубольцева А. С., Понкратова Е. К., Луговая А. В., Казанцева А. В. // Техника и технология пищевых производств. 2014. № 4. С. 43–49.
32. Дробот В. И. Использование нетрадиционного сырья в хлебопекарной промышленности. Киев: Урожай, 2008. 152 с.
33. Martins Z. E., Pinho O., Ferreira I. M. P. L. V. O. Food industry by-products used as functional ingredients of bakery products // Trends in Food Science & Technology. 2017. Vol. 67. P. 106–128. doi: 10.1016/j.tifs.2017.07.003
34. A review: Modified agricultural by-products for the development and fortification of food products and nutraceuticals / Lai W. T., Khong N. M. H., Lim S. S., Hee Y. Y., Sim B. I., Lau K. Y., Lai O. M. // Trends in Food Science & Technology. 2017. Vol. 59. P. 148–160. doi: 10.1016/j.tifs.2016.11.014
35. Current trends in the enhancement of antioxidant activity of wheat bread by the addition of plant materials rich in phenolic compounds / Dziki D., Różyło R., Gawlik-Dziki U., Świeca M. // Trends in Food Science & Technology. 2014. Vol. 40, Issue 1. P. 48–61. doi: 10.1016/j.tifs.2014.07.010
36. Mango seed: Functional and nutritional properties / Torres-León C., Rojas R., Contreras-Esquivel J. C., Serna-Cock L., Belmares-Cerda R. E., Aguilar C. N. // Trends in Food Science & Technology. 2016. Vol. 55. P. 109–117. doi: 10.1016/j.tifs.2016.06.009
37. Bharath Kumar S., Prabhasankar P. Low glycemic index ingredients and modified starches in wheat based food processing: A review // Trends in Food Science & Technology. 2014. Vol. 35, Issue 1. P. 32–41. doi: 10.1016/j.tifs.2013.10.007
38. Ngemakwe P. N., Le Roes-Hill M., Jideani V. Advances in gluten-free bread technology // Food Science and Technology International. 2014. Vol. 21, Issue 4. P. 256–276. doi: 10.1177/1082013214531425
39. Products of chickpea processing as texture improvers in gluten-free bread / Bird L. G., Pilkington C. L., Saputra A., Serventi L. // Food Science and Technology International. 2017. Vol. 23, Issue 8. P. 690–698. doi: 10.1177/1082013217717802
40. Effect of microalgae incorporation on physicochemical and textural properties in wheat bread formulation / García-Segovia P., Pagán-Moreno M. J., Lara I. F., Martínez-Monzó J. // Food Science and Technology International. 2017. Vol. 23, Issue 5. P. 437–447. doi: 10.1177/1082013217700259
41. Investigation of the water-retaining capacity of the carbohydrate complex of rye-wheat dough with addition of polyfunctional food supplement “Magnetofood” / Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazareva T., Yevlash T. // EUREKA: Life Sciences. 2018. Issue 3. P. 56–64. doi: 10.21303/2504-5695.2018.00662
42. Ершов П. С. Сборник рецептур на хлеб и хлебобулочные изделия. Санкт-Петербург: Профи-информ, 2004. 190 с.